

## PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO: UMA REVISÃO\*

André Rosiak;  
Diego Pacheco Wermuth;  
Luana de Lucca de Costa;  
Letícia Dupont Silva  
Lirio Schaeffer

### Resumo

A cada vez mais intensa competitividade no mercado da manufatura e a exigência da produção de componentes com formas complexas e desempenho extremamente elevado tem induzido o desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação. Diante disso, por conciliar as vantagens do processo de forjamento e da metalurgia do pó, o processo de sinterforjamento vem ganhando cada vez mais espaço na indústria mundial. Esta técnica, desenvolvida a pouco mais de 5 décadas, possibilita, hoje, a obtenção de componentes com desempenho superior àqueles produzidos por outros processos de manufatura, principalmente devido a formação de uma estrutura metalúrgica de grãos finos e orientação equiaxial. Dessa forma, o presente estudo objetiva apresentar esta tecnologia moderna e de grande potencial, elucidando os principais fatores que envolvem o processo e expondo pesquisas recentes sobre o tema.

**Palavras-chave:** Manufatura; Sinterforjamento; Metalurgia do pó.

### SINTER FORGING PROCESS: A REVIEW

### Abstract

Competitiveness in the manufacturing market is increasingly intense and the requirement to produce components with complex shapes and extremely high performance has led to the development of new materials and manufacturing processes. Therefore, by combining the advantages of the forging process and powder metallurgy, the sinter forging process has been gaining more and more space in the world industry. This process, developed 5 decades ago, makes it possible to obtain components with higher performance to those produced by other manufacturing processes. Thus, the study aims to present this modern technology with great potential, elucidating the main factors that involve the process and exposing recent research on the subject.

**Keywords:** Manufacturing; Sinter forging; Powder metallurgy

- <sup>1</sup> *Engenheiro Metalúrgico, mestrando do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais – PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Mestre em Engenharia Metalúrgica, doutorando do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais – PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenheira Mecânica, mestre em engenharia, doutoranda do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais – PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, bolsista de iniciação científica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, doutor em engenharia, professor titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Uma continuação alternativa do processo convencional de metalurgia do pó (MP) consiste no forjamento de pré-formas sinterizadas, conhecido como sinterforjamento. Este método vem despertando grande interesse em todo o mundo por possibilitar a produção de peças altamente solicitadas, com bom acabamento e com tolerâncias muito estreitas [1,2].

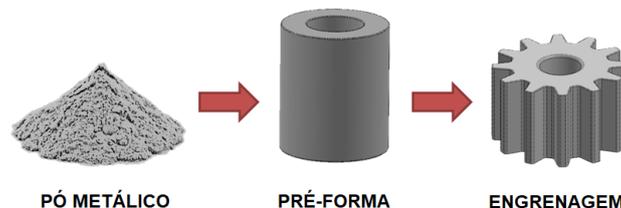
A investigação da viabilidade do processo começou independentemente em vários centros do mundo, principalmente em meados dos anos 60. O principal incentivo estava no fato de que a alta precisão das peças de MP não era acompanhado de um desempenho e de propriedades mecânicas suficientes para aplicações altamente solicitadas. Mais recentemente, com o avanço do processo, foi possível obter componentes sinterforjados com desempenho superior aos seus correspondentes forjados [3,4,5]. O aumento de desempenho tem sido atribuído às propriedades mecânicas isotrópicas, granulometria interna fina e acabamento superficial superior [6].

Diante disso, um número cada vez maior de projetistas está dando preferência a componentes sinterforjados em substituição aos componentes tradicionalmente fabricados por fundição, estampagem ou usinagem. Assim os componentes obtidos através do forjamento de pré-formas sinterizadas vem assumindo uma posição importante na indústria, sendo aplicados com sucesso em uma ampla gama de produtos, nas indústrias automotiva, agrícola, bélica e de eletrodomésticos [7]. As principais aplicações deste processo dizem respeito à indústria automotiva, especialmente para produção de engrenagens e bielas [8]. Talvez o exemplo mais bem sucedido de todos os componentes sinterforjados sejam as peças de transmissão automática [6].

Destarte, o presente estudo objetiva apresentar esta tecnologia moderna e de grande potencial, elucidando os principais fatores que envolvem o processo e expondo pesquisas recentes sobre o tema.

## 2 DESENVOLVIMENTO

O processo é bastante simples e baseia-se na técnica convencional de MP de compactação e sinterização para obtenção da pré-forma e seu posterior forjamento. A pré-forma sinterizada é aquecida e transferida para matrizes de forjamento e conformada para o nível de densidade desejado por um único curso [9]. A figura 1 mostra o pó, a pré-forma e uma engrenagem dentada forjada: é um processo muito simples [10].

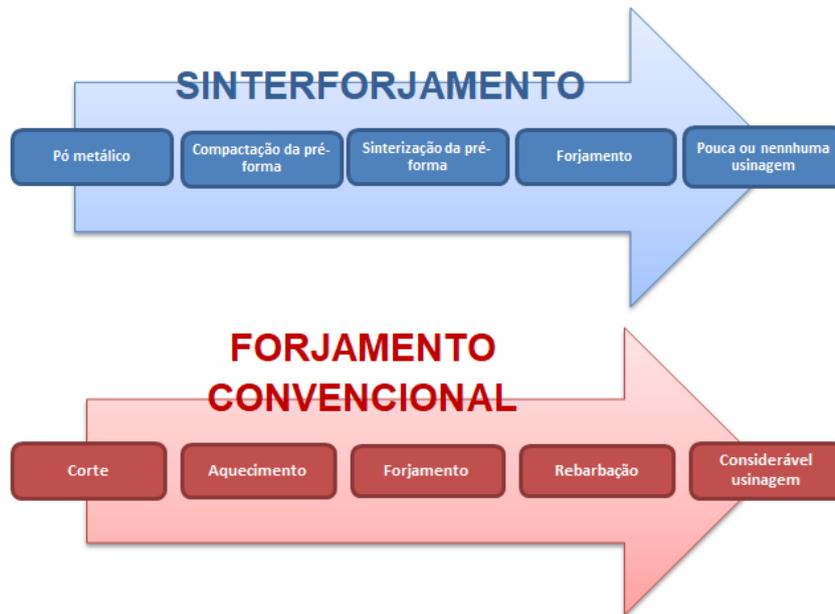


**Figura 1.** Processo de sinterforjamento de uma engrenagem (adaptada de [10]).

O processo de sinterforjamento combina as vantagens do processo convencional de metalurgia do pó, com a resistência adicional proporcionada pela

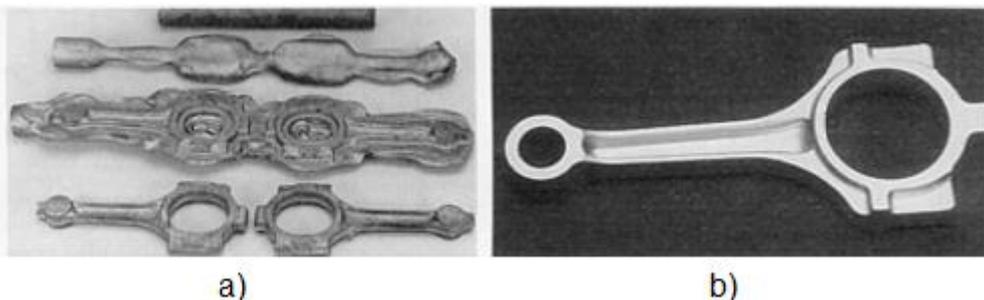
eliminação da porosidade que ocorre no forjamento [3]. Os fluxogramas de processo para processamento de pré-formas em pó e processamento convencional são ilustrados na Figura 2 [10].

Ao comparar a rota pela qual os componentes tradicionalmente forjados e pré-formados em pó forjados são feitos, fica claro que enquanto o número básico de estágios de produção é similar, o número de passos reais de forjamento varia significativamente. No forjamento convencional, a geratriz é submetida a vários golpes de forjamento em uma série de matrizes para desenvolver a forma final. No sinterforjamento, no entanto, um componente bastante complexo pode ser produzido em apenas uma operação de forjamento, permitindo taxas de produção elevadas que podem chegar a 40 golpes por minuto [8,10].



**Figura 2.** Fluxogramas das etapas dos processos de Sinterforjamento e Forjamento Convencional [10].

Além disso, o processo de sinterforjamento possibilita também uma redução ou até mesmo a eliminação das etapas de usinagem ou outros pós-processamentos devido à eliminação de rebarba. A redução de consumo de material, através da eliminação da rebarba, e de etapas de forjamento é ilustrada na Figura 3, onde bielas produzidas através do sinterforjamento e do forjamento convencional são mostradas [9].



**Figura 3.** Comparação da seqüência de fabricação de bielas. (a) Sequência típica do forjamento convencional. (b) Biela sinterforjada [9].

Além de tornar o processo mais ágil, o forjamento de pré-formas sinterizadas ainda tem as seguintes vantagens [11,12]:

- 1 Eliminação do desperdício de material normalmente associado a métodos de produção mais convencionais;
- 2 Melhor controle dimensional;
- 3 Bom acabamento superficial;
- 4 Estrutura de grãos finos orientada aleatoriamente;
- 5 Orientação equiaxial das propriedades físicas;
- 6 Os custos de forjamento são menores do que no forjamento convencional;
- 7 Menor carga de forjamento permitindo o uso de ferramentas menores;
- 8 Redução das temperaturas de forjamento, tornando o pré-aquecimento menos dispendioso;
- 9 Redução dos custos de ferramentas devido aos fatores acima.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre o processo de sinterforjamento e outros processos de fabricação onde algumas das vantagens listadas a cima podem ser quantificadas.

**Tabela 1.** Principais características do processo de sinterforjamento em comparação a outros processos de fabricação [13].

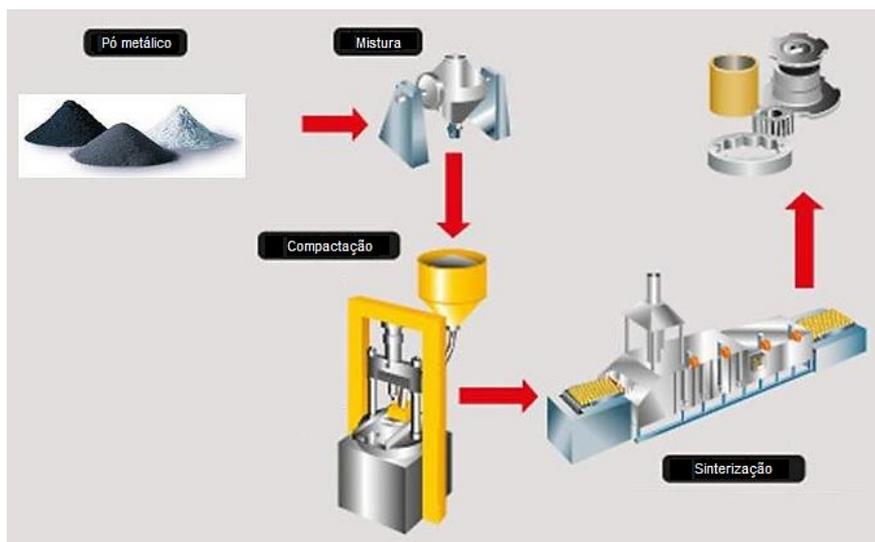
Processo	Pré-forma para sinterforjamento	Sinterizado	Forjamento a quente	Forjamento a frio	Fundição de precisão
Peso em Kg	0.1-5	0.01-1	0.05-1000	0.01-35	0.1-10
Relação altura/diâmetro	≤ 1	≤ 1	Não limitado	Não limitado	Não limitado
Forma	Sem muitas variações na seção transversal e cavidade limitadas	Sem muitas variações na seção transversal e cavidade limitadas	Qualquer forma, mas com cavidades limitadas	Principalmente formas axissimétricas	Qualquer forma
Utilização de material em %	100	100	50-70	95-100	70-90
Tolerâncias	IT 8-10	IT 6-8	IT 13-15	IT 7-9	IT 8-10
Rugosidade superficial em $\mu\text{m}$	5-30	1-30	30-100	1-10	10-30
Número de peças onde a produção começa a se tornar economicamente vantajosa (para 0,5 kg/peça)	20000	5000	1000	5000	2000
Principais características	Alta resistência, sem necessidade de usinagem	Resistência moderada, materiais porosos e sem necessidade de usinagem	Alta resistência e considerável usinagem	Alta resistência e usinagem mínima	Resistência intermediária e usinagem mínima
Custo da produção de uma unidade (sendo o sinterizado = 100%)	250	100	150	150	100
Possibilidade de automação	Boa	Boa	Limitada	Muito boa	Limitada

Do ponto de vista da MP, a fabricação de pré-formas é consideravelmente menos custosa do que a produção convencional. Esta tecnologia estabeleceu um mercado próprio, principalmente nos EUA, para fabricação produtos cilíndricos de paredes finas e componentes de transmissões automáticas, [10].

Como há entre as montadoras uma tendência de buscar sempre uma maior eficiência de combustível, a possibilidade de redução de peso pode ser um poderoso incentivo para a escolha de peças sinterforjadas [9]. Por exemplo, através da aplicação do processo de forjamento de sinterizados para obtenção de bielas, a empresa Porsche alcançou tolerâncias tais que a necessidade de balanceamento foi virtualmente eliminada. De fato, a redução do tamanho dos amortecedores resultou em uma economia de peso de 10% [14]. Além da Porsche, a Toyota está usando agora bielas sinterforjadas seu modelo Camry. Outros exemplos mostram que economias consideráveis também são alcançadas na produção de rolamentos cônicos. Além da redução de custos, é possível elevar a vida em fadiga destes componentes produzidos a partir de aços de alta qualidade [6].

## 2.1 Metalurgia do pó

O processo da metalurgia do pó, utilizado para desenvolvimento das pré-formas posteriormente forjadas, envolve quatro etapas fundamentais: a obtenção do pó, a mistura, compactação e a sinterização dos pós, como podem ser visto no esquema, de acordo com a Figura 3 [15,16].



**Figura 4.** Etapas do processo de metalurgia do pó convencional (adaptado de [17])

Os fatores decisivos durante o processamento das pré-formas e que devem ser rigidamente controlados durante o processo de metalurgia do pó são o tamanho das partículas de pó e a distribuição da pressão de compactação. O controle rigoroso da uniformidade da matéria prima é imprescindível. O pó de metal fino resulta em mais densificação e melhoria na forjabilidade do pré-molde [10]. Diversos processos são empregados para obtenção de pó metálico, sendo que a sua escolha depende da aplicação pretendida [7].

Na segunda etapa do processo o pó metálico é misturado aos elementos de liga e ao lubrificante. Vale exaltar a importância do lubrificante, uma vez que este diminui o desgaste do molde, facilita a ejeção da peça e age para distribuir a pressão em toda a peça enquanto ela está sendo compactada [1,18].

O design da pré-forma que será forjada depende muito do processo de compactação. O tamanho, forma, peso, densidade e tolerâncias da pré-forma limitam os métodos que podem ser usados para fabricá-lo. O controle de peso da pré-forma e a velocidade do preenchimento da cavidade do molde são fatores críticos de produção [18]. Verifica-se que a densidade relativa da pré-forma aumenta com o aumento da pressão de compactação, temperatura de sinterização e carga de forjamento [10].

O estágio da sinterização baseia-se no aquecimento do compactado verde a altas temperaturas, abaixo da temperatura de fusão do metal base, onde ocorre a sua consolidação [16]. Além da temperatura, a velocidade de aquecimento e resfriamento, o tempo de permanência e a atmosfera devem ser controlados [7].

## 2.2 Projeto da pré-forma

A chave principal para o sucesso do sinterforjamento é o design adequado da pré-forma. O seu projeto, devido a sua complexidade, atualmente é realizado com o auxílio de softwares de simulação numérica que possibilitam uma redução do tempo de projeto e menores custos de desenvolvimento [9]. A etapa subsequente de forjamento deve garantir a densificação do material, além de controlar a sua forma e suas dimensões [10].

As características de fluxo de metal e de fratura são consideradas no projeto da pré-forma. O fluxo de metal nas seções de uma peça forjada axissimétrica pode ser considerado como sendo submetido a um dos três modos diferentes: compressão; extrusão direta; e extrusão indireta. Assim o design da pré-forma deve ser tratado individualmente para cada peça complexa.

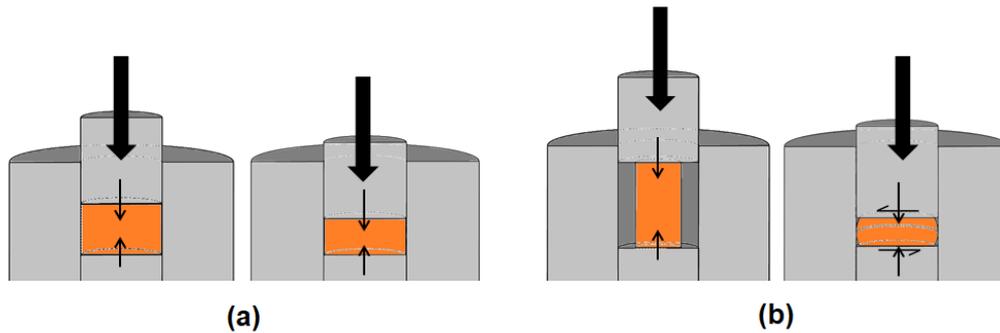
No entanto, algumas diretrizes podem ser obtidas a partir do forjamento de formas genéricas simples. De forma que o processo de sinterforjamento pode se desenvolver em duas linhas distintas de pré-formas [18]:

- (1) Pré-forma com corte transversal muito semelhante a da peça final, também conhecido como *hot repressing* (recalque a quente).
- (2) Pré-forma relativamente simples em relação a peça que possui forma muito diferente, semelhante ao forjamento convencional.

O primeiro, durante o forjamento, sofre densificação com pouco ou nenhum fluxo lateral, enquanto o segundo alcança a densificação e mudança de forma simultaneamente através de grande grau de deformação plástica e fluxo lateral [18].

No forjamento, o fluxo lateral sujeita os poros a uma combinação de tensão normal e de cisalhamento. A tensão de cisalhamento auxilia a normal no fechamento dos poros e pressões mais baixas são necessárias para a densificação do material. Além disso, a ação de cisalhamento aumenta a força de adesão entre os lados opostos dos poros, o que aumenta a solidez da estrutura metalúrgica [19].

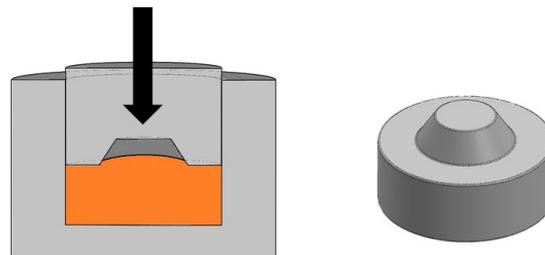
O fluxo lateral durante o forjamento envolve um estágio de deformação no qual as superfícies livres verticais sofrem expansão e as tensões de tração podem se desenvolver, levando à fratura. Isso é mostrado na Figura 5 [18].



**Figura 5.** Forjamento de (a) pré-formas com pouco ou nenhum fluxo lateral de material e de (b) pré-formas com considerável fluxo lateral (adaptado de [18]).

A probabilidade de fratura aumenta à medida que aumenta a quantidade de fluxo lateral antes de atingir as paredes laterais das matrizes. No caso de *hot repressing* a fratura é evitada, uma vez que a pré-forma está inicialmente em contato com as paredes laterais da matriz e as tensões de tração não ocorrem. Assim, o projeto de pré-formas envolve a especificação da forma e das dimensões, de forma que a deformação durante o forjamento seja suficiente para atingir a densidade total, mas sem gerar a fratura do material [18].

Como citado anteriormente, o forjamento a quente de pré-formas envolve muitas vezes não apenas compressão, mas também extrusão. Um exemplo típico é o da extrusão do cilindro ilustrado na figura 6 [20].



**Figura 6.** Esquema da extrusão do cilindro indicando tensão de tração na superfície livre superior (adaptado de [20]).

A superfície superior do cilindro é uma superfície livre que sob tensões de cisalhamento e de tração sofre fratura quando as deformações atingem a quantidade crítica de fratura. Essas deformações podem ser evitadas alterando o ângulo de inclinação da cavidade da matriz ou usando uma pré-forma que preencha parcialmente a cavidade [20].

Suh e Kuhn [21] analisaram profundamente as condições sob as quais ocorre a fratura do material e como elas podem ser eliminadas por mudanças de projeto. Se durante o forjamento de uma engrenagem, por exemplo, forem geradas trincas no componente ainda parcialmente formado, essas trincas serão fechadas nos estágios finais do curso de forjamento conforme o material é pressionado contra a superfície da matriz. No entanto, a oxidação da superfície da trinca e o aprisionamento do lubrificante nas fissuras podem fragilizar as superfícies do componente. Fica evidente a importância de garantir que as pré-formas se mantenham íntegras durante a etapa final de forjamento.

## 2.3 Forjamento

Na etapa de forjamento, a pré-forma é transferida do forno de reaquecimento, lubrificada e forjada em apenas uma operação em matriz fechada. O processo de forjamento reduz a altura da pré-forma e força o metal a escoar para as cavidades das matrizes garantindo as suas tolerâncias e densidades finais [9].

A deformabilidade e as características de oxidação da pré-forma são importantes para a operação de forjamento. A deformabilidade de uma pré-forma é uma função de muitas variáveis: temperatura, design da pré-forma, composição química e características do pó. Em geral, as pré-formas altamente ligadas são mais difíceis de deformar. Quanto ao controle da oxidação da pré-forma, a aplicação de revestimentos nas pré-formas contendo carbono são muito comuns. Quanto menor a densidade da pré-forma, mais sério se torna o problema de oxidação. Além disso, a oxidação, em geral, piora com o aumento do tempo e da temperatura de exposição, embora os óxidos se tornem menos estáveis e o carbono mais protetor em relação ao metal à medida que a temperatura é elevada [18].

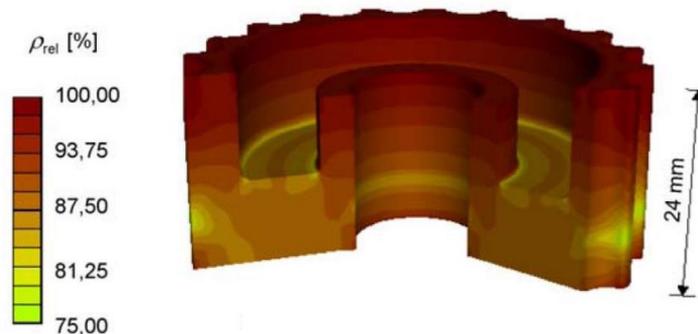
Uma porosidade abaixo de 50% é necessária para a eliminação de poros e boa adesão das partículas durante o forjamento [8]. Tipicamente, as pré-formas possuem uma densidade teórica entre 80 e 85% [9]. Em sua condição de densidade relativamente baixa na temperatura de forjamento, a pré-forma começa a se deformar plasticamente sob cargas de forjamento relativamente baixas. À medida que a densidade se aproxima do valor de 100%, a carga de forjamento requerida aumenta. Uma grande parte da forma final forjada é desenvolvida durante os estágios iniciais de deformação, quando as cargas necessárias são relativamente baixas. No final do curso de forjamento, quando o requisito de carga está no máximo, a maioria dos detalhes da forma já foi alcançada e os últimos estágios são simplesmente de compactação a quente, envolvendo relativamente pouca deformação plástica. Nos casos em que a pré-forma tem uma forma que corresponde aproximadamente à peça acabada, o trabalho a quente é essencialmente uma simples compactação envolvendo muito pouco fluxo lateral de metal [10].

Uma vez que a peça é forjada a quente, a extração da peça das matrizes é importante. A força de extração da peça da matriz depende da temperatura da pré-forma e da densidade da peça. Em geral, a força de extração diminui com o aumento da temperatura. A vida útil da matriz de forjamento pode ser prolongada mantendo a carga de forjamento e a força de extração tão baixa quanto possível. Como as duas últimas variáveis aumentam exponencialmente à medida que a porosidade zero é atingida, vale a pena considerar se um material totalmente livre de poros é essencial para a aplicação em questão [18].

Em uma investigação da deformação plástica das pré-formas de pó de metal sinterizado, fica claro que a mudança no volume ocorre devido à porosidade. Uma pré-forma com uma densidade relativa elevada produz tensões relativamente altas, enquanto que uma pré-forma de densidade relativa baixa produz um esforço relativamente baixo [9]. Fica evidente que durante o forjamento a constância volumétrica não é mais válida, pois a densidade dos sinterizados aumenta simultaneamente com a deformação plástica devido ao fechamento de poros. Assim, o processo de forjamento é sensível ao componente de tensão hidrostática [22,23].

A deformação plástica e a distribuição da densidades em materiais porosos durante a conformação foram estudados por [24], [25] e [26]. A distribuição de densidades não é uniforme ao longo da seção transversal como pode ser observado na figura 7. A distribuição de densidade será mais uniforme para um coeficiente de atrito menor e para uma pré-forma de densidade relativa inicial maior. A densidade

da pré-forma e a sua distribuição se tornam mais importantes à medida que a complexidade da peça aumenta. Em peças complexas é necessário ter a distribuição de massa correta na pré-forma para garantir o fluxo adequado de metal durante a deformação. A distribuição de massa inadequada pode resultar em baixa densidade em algumas áreas e sobrecarga das ferramentas em outras [27].



**Figura 7.** Distribuição de densidade em uma engrenagem sinterforjada.

Durante o forjamento, densificação e compressão ocorrem simultaneamente. Inicialmente, uma quantidade maior da carga é consumida na densificação e uma quantidade menor é utilizada para compactação. O material tem sua estrutura reorganizada e torna-se resistente e altamente orientado. O aumento percentual do diâmetro e a diminuição percentual da altura até a fratura são tomados como critério para avaliar a sua forjabilidade. A forjabilidade das pré-formas de pó melhora com o aumento da densidade relativa inicial [10].

As condições de atrito entre as matrizes e a peça de trabalho que afetam não somente a força e o modo de deformação, mas também as propriedades da peça acabada e o seu acabamento superficial foram analisadas por [28], [29] e [30]. A velocidade relativa entre o material e a superfície das matrizes de forjamento, juntamente com altas tensões, pode criar condições que promovem, além do deslizamento, a aderência entre ferramentas e a peça, o que deve ser evitado.

## 2.4 Pós Processamento

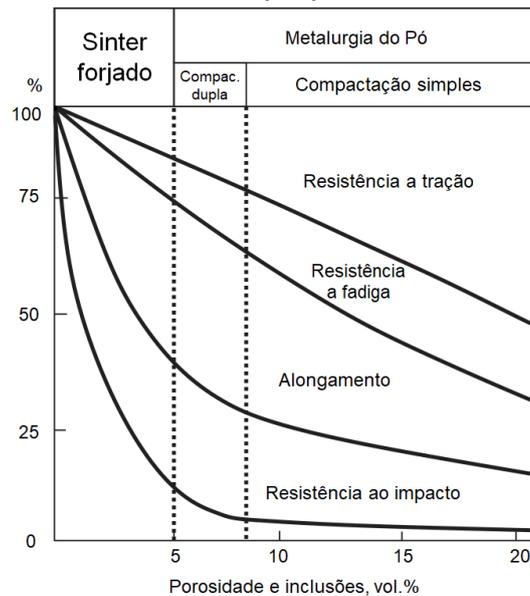
Em geral, os tratamentos térmicos empregados para as peças sinterforjadas são os mesmos utilizados para forjados convencionais. A maioria das peças sinterforjadas requerem apenas usinagem ou retificação mínima. Em operações de usinagem, as peças, em geral, exibem um comportamento mais consistente do que as peças lingotadas, porque as inclusões finamente dispersas no primeiro produzem cavacos curtos em vez de cavacos longos e contínuos [18].

## 2.5 Propriedades mecânicas de sinterforjados

A operação final de forjamento tem o objetivo de densificar o material e assim atingir as propriedades mecânicas desejadas. Dessa forma, as propriedades mecânicas das peças sinterforjadas são influenciadas por parâmetros de forjamento tais como temperatura, força de forjamento, perda térmica do material para as matrizes, velocidade da prensa e quantidade de fluxo lateral durante o forjamento [17].

A densidade total é desejada para atingir as propriedades máximas do material. Todavia, para obter uma redução das cargas de forjamento e conseqüentemente do desgaste das ferramentas seria atrativo alcançar a densidade máxima apenas nas áreas do componente a serem severamente solicitadas mecanicamente. No entanto, na prática, isso é bastante difícil de alcançar. Portanto, é preferível que as estruturas sejam totalmente densificadas na etapa de forjamento.

Estudos mostraram que o aumento da porosidade de 0% a 5% diminui a resistência à tração em 35%. A ductilidade mostra ainda maior sensibilidade a defeitos estruturais, como porosidade, entalhes ou inclusões. A figura 8 ilustra o efeito da porosidade e das inclusões nas propriedades mecânicas dos aços [31].

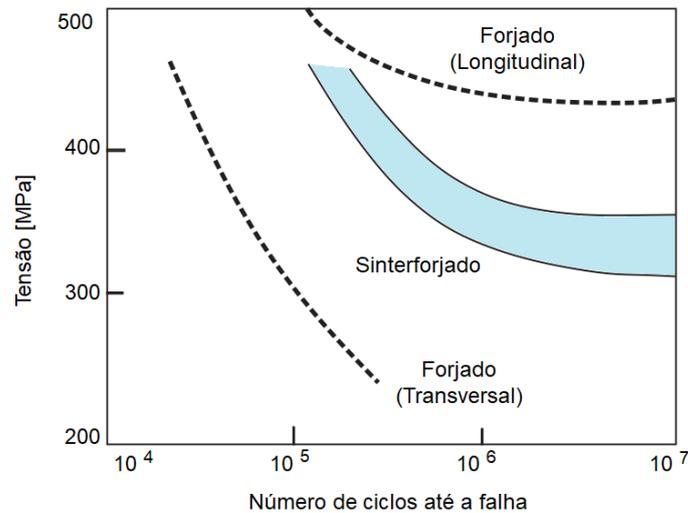


**Figura 8.** Relação entre as propriedades mecânicas e a % de porosidade e inclusões do material (adaptado de [31]).

Qualquer porosidade residual resulta em diminuição acentuada nas propriedades de tração e de fadiga, bem como na resistência ao impacto. Além do nível de porosidade, as propriedades mecânicas são afetadas pela quantidade de poros, sua distribuição, tamanho e morfologia [32]. Em geral, temperaturas de conformação mais altas e menor perda térmica para as ferramentas aumentam a densificação da peça forjada e, conseqüentemente, aumentam as propriedades mecânicas [18].

Sinterforjados têm resistência ao escoamento pelo menos igual a dos aços forjados da mesma composição química. As propriedades mecânicas ainda podem ser elevadas através de um refino do tamanho de grão. Quanto as propriedades dinâmicas, essas são análogas as dos aços forjados convencionalmente de temperabilidade equivalente. No entanto, há uma diferença muito grande que distingue a estrutura de um sinterforjado da de um componente de aço forjado convencionalmente. Quando ocorre um pequeno fluxo lateral, as propriedades de um sinterforjado são quase isotrópicas. Por comparação, o aço forjado possui propriedades extremamente anisotrópicas. Devido ao método de produção, existe uma estrutura de inclusões alongadas na direção da laminação, e as propriedades longitudinais são bastante diferentes daquelas transversais ao eixo de laminação. Infelizmente, os primeiros são os valores mais citados nas especificações, mas podem não ser necessariamente alcançados no componente [33]. Assim, geralmente, as propriedades dinâmicas dos produtos sinterforjado estão entre os

valores longitudinais e transversais dos aços forjados de temperabilidade equivalente, como ilustra a Figura 9.



**Figura 9.** Comportamento à fadiga de aço sinterforjado em comparação com material forjado convencionalmente (adaptado de [33]).

Por outro lado, sinterizados forjados com uma quantidade de fluxo lateral superior, tem suas propriedades dinâmicas, como fadiga e resistência ao impacto, melhoradas devido ao aumento do fluxo lateral, pois este garante a quebra de inclusões alongadas [18].

### 3 CONCLUSÃO

Com o intuito de atingir a densidade plena e assim as melhores propriedades mecânicas possíveis em componentes obtidos a partir de pós metálicos, o forjamento de sinterizados consolidou-se como uma técnica eficaz e atrativa ao mercado de manufatura. No sinterforjamento peças com geometrias complexas e tolerâncias estreitíssimas são produzidas com propriedades análogas as de peças forjadas convencionalmente, com a vantagem adicional de apresentar uma significativa redução de volume de material consumido devido a possibilidade de supressão da rebarba.

### REFERÊNCIAS

1. SCHAEFFER, L, Manufatura por Conformação Mecânica, Imprensa Livre, 2016.
2. CUNDILL, R. T., MARSH, E., & RIDAL, K. A., MECHANICAL PROPERTIES OF SINTER/FORGED LOW-ALLOY STEELS. Powder Metallurgy, 13,1970.
3. GULL, G.W. Powder Metallurgy, 1970.
4. THOMSON, P.F., Densification of sintered metal compacts by cold deformation, Journal of Mechanical Working Technology 13 (2) (1986) 219–227.
5. JONES P.K., Powder Metallurgy, 1970.
6. JAMES, W B, New Shaping Methods For Powder Metallurgy Components.
7. MENDONÇA, A. I., Desenvolvimento do Processo de Sinterforjamento a Morno de uma Cruzeta de Aço ABNT 1045
8. SEETHARAMAN S, Fundamentals of Metallurgy, 2005.
9. LEE, P. W., Powder Metal Technologies and Applications, Vol, 7 of ASM Handbook, 1998.

10. SUTRADHAR, G., Production of sinter-forged components, Journal of Materials Processing Technology, 1994.
11. CULL G.W., Mechanical and metallurgical properties of powder forging, Powder Metallurgy 13 (1970) 156.
12. HAUSNER H.H., Handbook of Powder Metallurgy, 1984.
13. LARASON, L.,M., Proceedings of PM, 1984.
14. JAMES, W B, Current Trends in Powder Forging, Metal Powder Report, 1982.
15. CHANG, I., and ZHAO, Y., Advances in powder metallurgy Properties, processing and applications, 2013.
16. TSUKERMAN, S. A., Powder Metallurgy, 1965.
17. TRIPATHY, A., A review of solid state processes in manufacture of Functionally Graded Materials, International Journal of Engineering and Technology, 2018.
18. UPADHYAYA G. S., Powder Metallurgy Technology, 2002.
19. ZHANG, Y, On the Effect of Stress Triaxiality on Void Coalescence, International Journal of Fracture, 2007.
20. GRADY T.G., J. Materials Shaping Technology, 1989.
21. SUH, S.K. and KUHN, H.A., Modern Developments in Powder Metallurgy, 1977.
22. ALVESA, L.M.M., P.A.F. Martinsa, J.M.C. Rodrigues, A new yield function for porous materials, Journal of Materials Processing Technology 179 (1–3) (2006) 36–43.
23. JHA, A.K., S. Kumar, Forging of metal powder preforms, International Journal of Machine Tool Design and Research 23 (1996) 210.
24. MEAR M. E., Radial Flow of sintered powder metals. International Journal of Mechanical Sciences 1989.
25. BRUHNS O., Densification of powder metals with assumed ellipsoidal yield surface. International Journal of Mechanical Sciences 1993.
26. Wang P. T., Evolution of porosity during thin plate rolling of powder-based porous aluminum. Powder Technology 1994.
27. HUANG, C., Forging simulation of sintered powder compacts under various frictional conditions, International Journal of Mechanical Sciences, 2001.
28. HARTLEY P., Influence of friction on the prediction of forces, pressure distributions and properties in upset forging, International Journal of Mechanical Sciences 1980.
29. JHA A. K., and KUMAR S., Deformation characteristics and fracture mechanisms during the cold forging of metal powder preforms, International Journal of Machine Tool Design & Research 1986.
30. MAMALIS A. G., Open-die forging of sintered cylindrical billets: an analytical approach, Journal of Materials Processing Technology 1999.
31. HUPPMAN, W J, Powder Forging, International Metals Reviews, 1978.
32. CHAWLA N., Threedimensional characterization and modeling of porosity in PM steels, Int. J. Powder Metall., 2009.
33. HUPPMANN, W. J., & BROWN, G. T., The Steel Powder-Forging Process—A General Review. Powder Metallurgy, 1978.